

超高压喷射工法による杭先端 根固め方法の実験的研究

脇屋泰士¹・沖 健¹・須見光二²・沼田博昭³・森本宣弘⁴

¹正会員 工修 川崎製鉄(株), 建材技術部 (〒100-0011東京都千代田区内幸町2丁目)

²工修 (株)ジオトップ, 技術開発本部 (〒104-0033東京都中央区新川1丁目)

³ノザキ建工(株), 技術部 (〒261-0002千葉県美浜区新港223)

⁴川鉄テクノストラクチャー(株), 九州支店 (〒812-0041福岡市博多区吉塚1丁目)

埋込み杭工法においては、杭先端部の根固めを行う工法が多く実用化されており、その支持力の発現のためには、根固め部の品質を確保することが非常に重要であると考えられる。本研究は、地盤改良技術として開発された超高压喷射工法を根固め手法として適用するものであり、施工方法を検討するために根固め部の築造実験を実施している。実験においては築造した根固め部を掘り出し、形状や圧縮強度に関する調査を行うとともに、室内載荷試験により、構造耐力および破壊メカニズムについての検討を行った。その結果、所定の根固め強度を確保するために必要となるセメントミルクの配合条件や注入量を明らかにするとともに、根固め形状に対する高压水の流量や圧縮空気の有無、繰返し施工等による影響を確認した。

Key Words : jet grout method, pile tip grout, water cement ratio, in-situ experiment, loading test, failure mechanism

1. はじめに

既製杭の主要な工法の1つである埋込み杭工法においては、支持力の発現のため杭先端部の地盤に硬化材を注入して根固めを行う工法¹⁾が多く実用化されている。確実な支持力を期待するためには、根固め部の品質を確保することが非常に重要であり、施工方法としては機械的に開閉する拡大ビットを用いる方法とセメントミルクを高压喷射する方法が開発されている。セメントミルクを高压喷射する工法の場合²⁾には、喷射ロッドを回転させながら、20MPa程度の圧力でセメントミルクを喷射することで、杭先端部に円柱状の固化体を造成している。

もともとこうした硬化材を地盤中に高压喷射する工法は、地盤改良の分野で発達してきた技術であり、ジェットグラウト工法³⁾として利用されている。現在、大きく分けて2種類の工法があり、図-1にそれらの概念図を示す。1つは硬化材そのものを高压で喷射する工法(高压喷射工法)であり、もう1つは40MPa程度の超高压水により地盤を切削し、同時に硬化剤を低压(2~5MPa)で充填する方法(超高压喷射工法)である。いずれの工法も切削距離を大きくするために高压噴流の回りを空気で包み込むよ

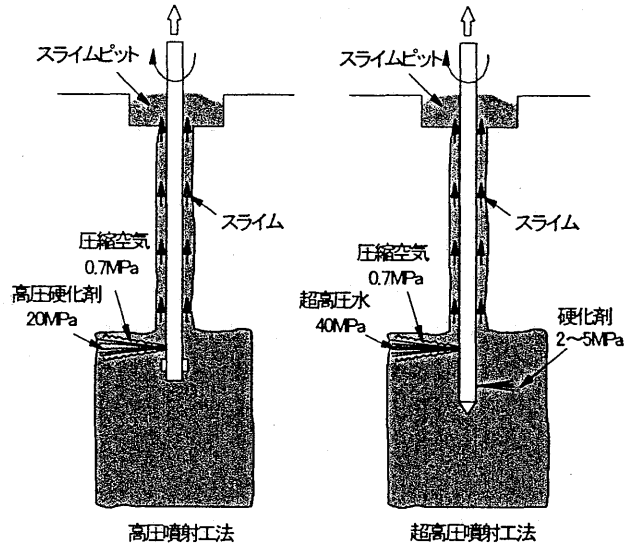


図-1 ジェットグラウト工法

うに圧縮空気を噴出している。両者の適用領域としては、高压喷射工法の場合はN値が $N \leq 50$ の領域で用いられるのに対して、超高压喷射工法の場合は、 $N \geq 50$ に対しても適用可能であり、かつ高压喷射工法より大きな改良体が造成できるとされている。したがって、超高压喷射工法を杭の根固め技術として適用すれば、より堅固な支持層においても確実な

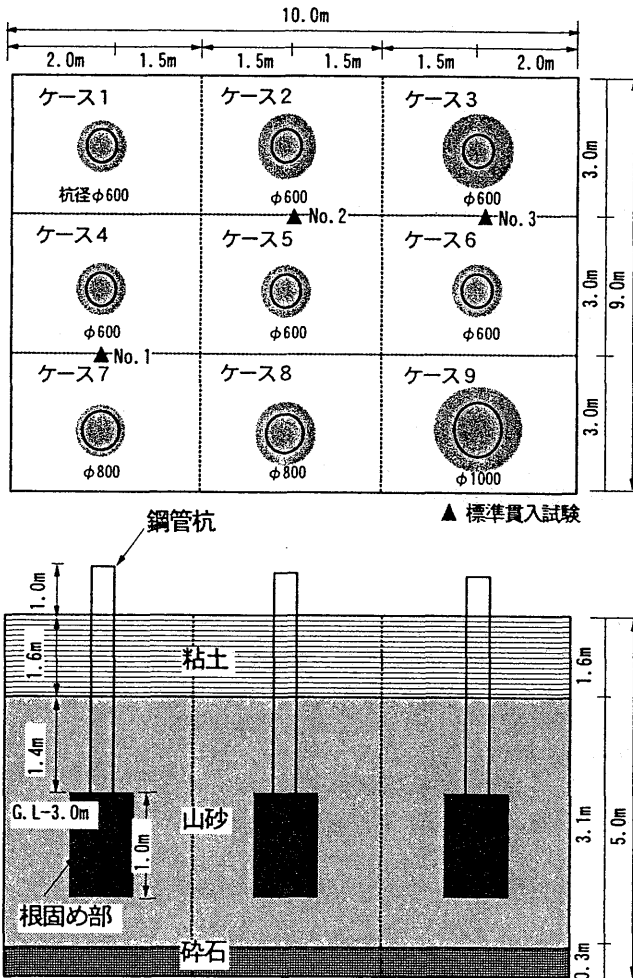


図-2 杭配置と地盤調査位置

根固め施工が可能となると考えられる。

先にも述べたように、杭の根固め技術としてセメントミルクを高圧で噴射する高圧噴射工法を応用したものは既に実用化されており、多くの実績があるのに対して超高压噴射工法の適用に関しては、いくつかの実現場における適用事例^{4), 5)}が報告されているものの、根固め部の形状や破壊耐力など根固め部の構造性能に関する検討は行われておらず、杭の根固め工法として確立されたものにはなっていない。

そこで、超高压噴射工法を適用した根固め施工技術について検討を行うため、2度におよぶ根固め部の築造実験を実施した。本論文はそれらの結果について報告するものである。1回目の実験は、超高压噴射工法の標準施工仕様を参考にして実験パラメータを設定したものであり、高圧水の噴射流量等を変化させ、根固め部の形状および強度に対する影響を検討している。実験内容は「2. 根固め築造実験(その1)」に示しており、その結果として、根固め部の圧縮強度の不足と内部の不均質な状態により、その構造耐力が低下することが明らかとなった。

そこで2回目の実験は、施工方法を改善する目的

表-1 粒度試験結果

礫分 (2mm以上)	(%)	3
砂分 (2mm~74 μ m)	(%)	88
シルト分 (74 μ m~5 μ m)	(%)	8
粘土分 (5 μ m~)	(%)	1
最大粒径	(mm)	13.2
土粒子の密度	ρ_s	2.73

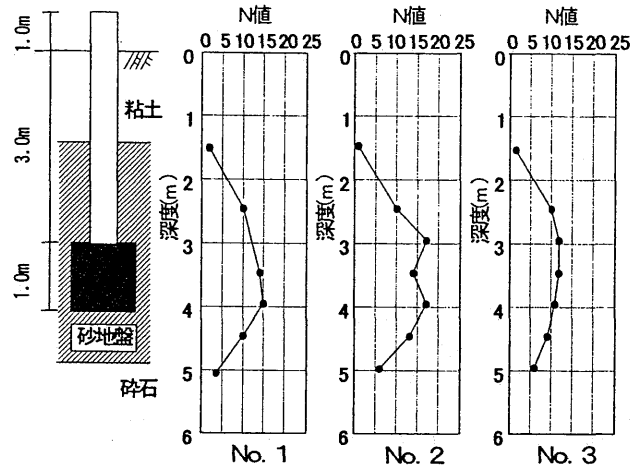


図-3 実験地盤の調査結果

で実施し、所定の性能を得るために必要な硬化材の配合条件や注入量を明らかにするとともに、根固め形状に対する圧縮空気の有無や繰返し施工などの影響について検討している。その結果は「3. 根固め築造実験(その2)」に示されている。

2. 根固め築造実験(その1)

(1) 実験概要

根固め部の築造は山砂を用いた実験用地盤を作製して行った。図-2に杭配置と地盤の断面図および地盤調査位置を示す。試験杭は杭径 ϕ 600mm, ϕ 800mm, ϕ 1000mm, 長さ4mの鋼管杭を用いた。全部で9ケースの根固め施工を行い、養生後に全ての根固め部を掘り出し、各種試験を実施した。実験地盤の作製においては、地下水位がGL-9.0mにあるローム粘土地盤をGL-5.0mまで開削し、自然含水状態にある山砂(含水比 $W_n=30\%$)を埋め戻して作成した。最初に底面に厚さ300mmほど砕石を敷き込み、その上に200mmごとに山砂を積み重ねて振動ローラーで転圧し、厚さ3.1mの砂地盤を造成した。表層部分には現地土であるローム粘土を1.6m埋戻し、根固め施工時に噴射流が吹き上がるのを抑えることとした。山砂の粒度試験結果を表-1に示す。地盤調査とし

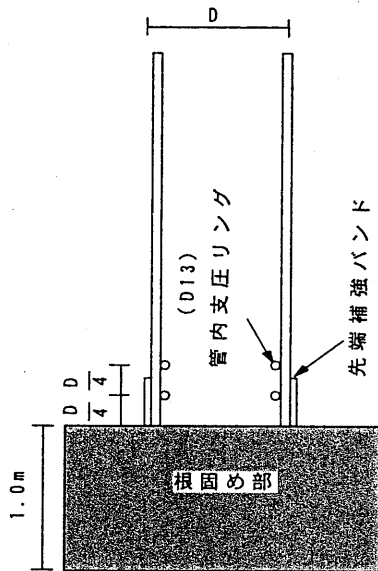


図-4 試験杭の先端部仕様

て標準貫入試験を3カ所を実施し(図-2▲印箇所), その結果を図-3に示す. 根固め築造位置において $N=10\sim15$ の地盤となっている. 図-4に杭先端部仕様を示す. 杭先端部にはJIS A 5525に準じる先端補強バンドを取り付け, 管内には根固め部と杭の一体化を図るためにD13の鉄筋を用いて2段の支圧リングを取り付けた. 鋼管杭はオーガスクリュウで中掘施工を行いながら, パワージャッキにより $GL-3.0m$ まで圧入した後, 図-5に示す超高压噴射工法の施工装置により杭先端部に長さ1.0mの根固め部を築造した.

(2) 実験パラメータ

実験条件として高压水の噴射圧力を $P=40MPa$ とし, 根固め部の必要圧縮強度は根固め部のFEM解析⁶⁾を参考にして $\sigma_c=20N/mm^2$ とした. セメントミルクの水セメント比は必要圧縮強度と圧送性を考慮して $W/C=65\%$ とした. セメントミルクの注量は根固め部を100%置換するために, 想定根固め体積の1.2倍を注入することとした. これらの条件は全てのケースで同一とした. 実験パラメータとしては, 高压水の流量と噴射ロッドの回転数および移動速度を取り上げ, 超高压噴射工法の施工仕様³⁾を参考にして設定した. 実験パラメータの一覧を表-2に示す. 根固め部についてはロッドの回転数5回/分, 移動速度50mm/分を標準仕様とした. 一方, 管内部の施工では高压水の必要到達距離が短いため, 根固部よりも施工速度を上げることとし, 移動速度を110mm/分, 回転数を11回/分とした. ケース1~3は高压水流量をパラメータとして根固め径への影響を検討するものであり, ケース4~6は噴射ロッドの移動

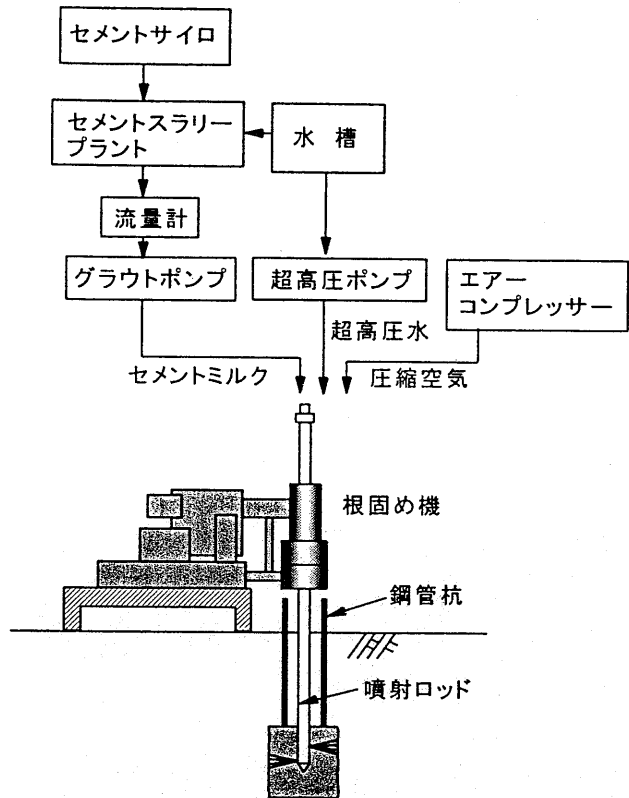


図-5 超高压噴射工法の施工装置

速度および回転数を変化させ検討を行うものである. さらに, ケース7~9は大径杭への適用性を検討するとともに, 掘り出し後に半割して内部の状態を調査するものである.

(3) 根固め部の形状および圧縮強度

根固め部を3週間の養生後に掘り出した. 掘り出し状況を写真-1に示す. 掘り出した根固め部のうちケース8, 9については半割にし, 内部の状況を観察した. 写真-2にケース9の半割状況を示す. 根固め部の表面は高压の噴射流によって鬚状の凹凸が形成されていた. また, 外周部には砂分の多く混入した脆弱な部分があり, その内側にセメントミルクで置換された強度の高い部分があった. この工法は超高压水により地盤を切削し, その部分をセメントミルクの注入により置換するものであるが, 外周部には置換されない領域が残ることが明らかとなった. また, 根固め部の下方中央部にはこぶし大程度の土塊が点在し, 内部は不均質な状態となっていた. 図-6にケース9の試験体の各部位での圧縮強度を示す. 圧縮強度は目標値 $20N/mm^2$ を満たさないものが多く, 管内はさらに強度は弱くなっていた. また, 根固め部の一軸圧縮強度は中心部分が小さく, 外周に向かって強度が高くなっていた. これは地下水位が実験地盤の底面以深にあり, 山砂の含水比は30%程度であったため, 根固め部の外周部は脱水養生さ

表-2 実験パラメータの一覧 (実験その1)

ケースNo	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6	ケース7	ケース8	ケース9
杭 径 (mm)	600	600	600	600	600	600	800	800	1000
想定根固め径 (mm)	1000	1200	1500	1000	1000	1000	1000	1200	2000
評価項目	高圧水流量の影響			移動速度、回転数の影響			大径杭への適用性・半割調査		
根固め部の施工仕様									
回転数R (回/分)	5			5	11	5	5		
移動速度V (mm/分)	50			50	110	125	50		
高圧水流量Q (ℓ/分)	31.4	39.8	49.1	31.4			31.4	39.8	64.9
管内部の施工仕様									
回転数R (回/分)	11			11	20	35	11		
移動速度V (mm/分)	110			110	200	350	110		
高圧水流量Q (ℓ/分)	31.4	39.8	49.1	31.4			31.4	39.8	64.9

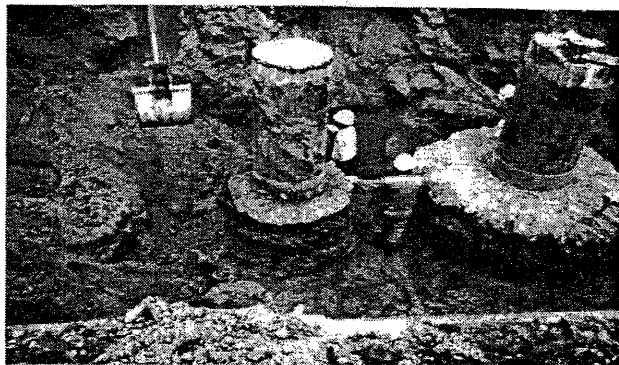


写真-1 掘り出し状況

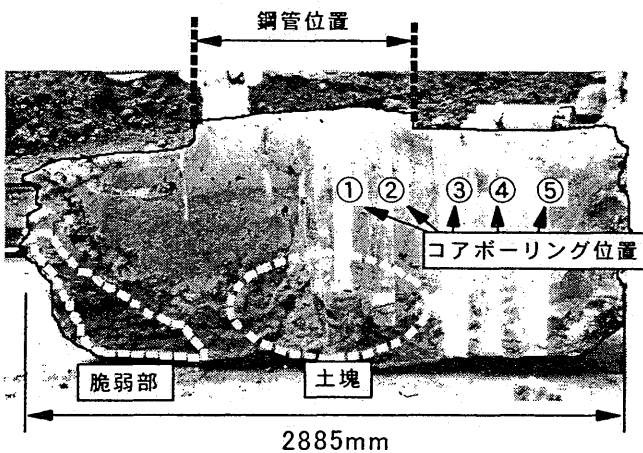


写真-2 根固め部の内部状況 (ケース9)

れ、強度が高くなった可能性が考えられる。また、土塊が点在し、圧縮強度が目標値 20N/mm^2 よりも小さくなった原因として、①噴射ロッドを下から上に1度だけ引き上げる施工手順としたため、十分に内部が攪拌されなかったこと、②想定した根固め径に比べて実際に築造された根固め径は平均1.7倍あり、セメントミルクの注入量が想定根固め体積の1.2倍では少なかったものと考えられる。そのためセメントミルクによる置換が十分に行われず、圧縮強度が小さく、内部に土塊が残ったものと考えられた。

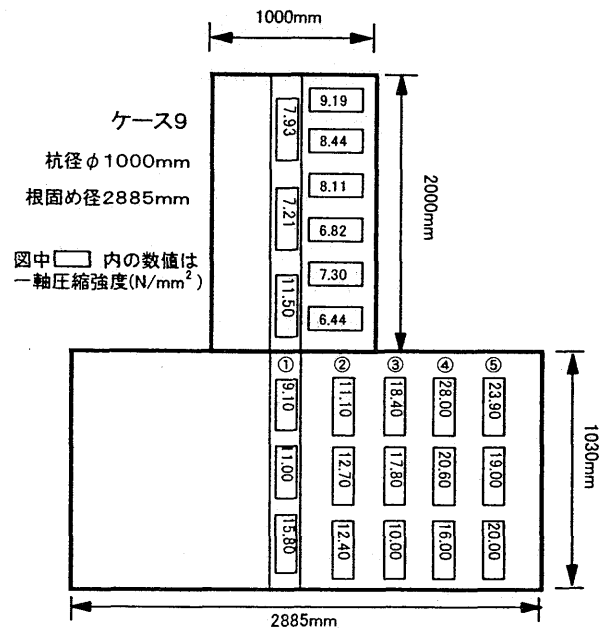


図-6 一軸圧縮試験結果 (ケース9)

根固め径の測定結果を表-3に示す。これは根固め高さ方向の3箇所計測した結果の平均値である。脆弱部を含む全体の根固め径(外径)と砂分を多く含む脆弱な部分を除いた堅固な部分(硬質部)だけの根固め径をそれぞれ示している。標準仕様(回転速度5回/分、移動速度50mm/分)により施工を行った根固め径は想定値の1.5倍~1.9倍となっているのに対して、移動速度を上げたケース5およびケース6は想定値の1.2倍~1.3倍程度となっており、根固め径が小さくなった。また、各ケースの形状を写真-3に示す。ケース5およびケース6を除く標準仕様では比較的安定した円柱状の根固め部が築造できている。ケース7は大径杭を用いた場合であるが、ケース1、4と同等の形状となっており、杭径の違いによる影響は無かった。また、標準仕様以外においては、標準仕様よりも回転数を速めたり(ケース5)、噴射ロッドの移動速度を上げたりする場合

表-3 根固め径の測定結果

	想定値 (mm)	外径		硬質部	
		実測値(mm)	比率	実測値(mm)	比率
ケース1	1000	1820	1.82	1350	1.35
ケース2	1200	1855	1.55	1435	1.20
ケース3	1500	2305	1.54	1805	1.20
ケース4	1000	1895	1.90	1420	1.42
ケース5	1000	1330	1.33	1050	1.05
ケース6	1000	1235	1.24	956	0.96
ケース7	1000	1800	1.80	1340	1.34
ケース8	1200	2285	1.90	1355	1.13
ケース9	2000	2885	1.44	2345	1.17
	ケース5,6以外の平均値		1.70	平均値	1.26

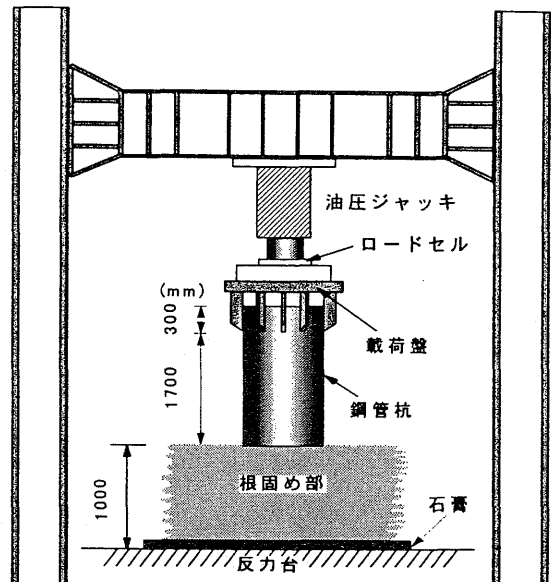


図-7 10MN載荷試験装置

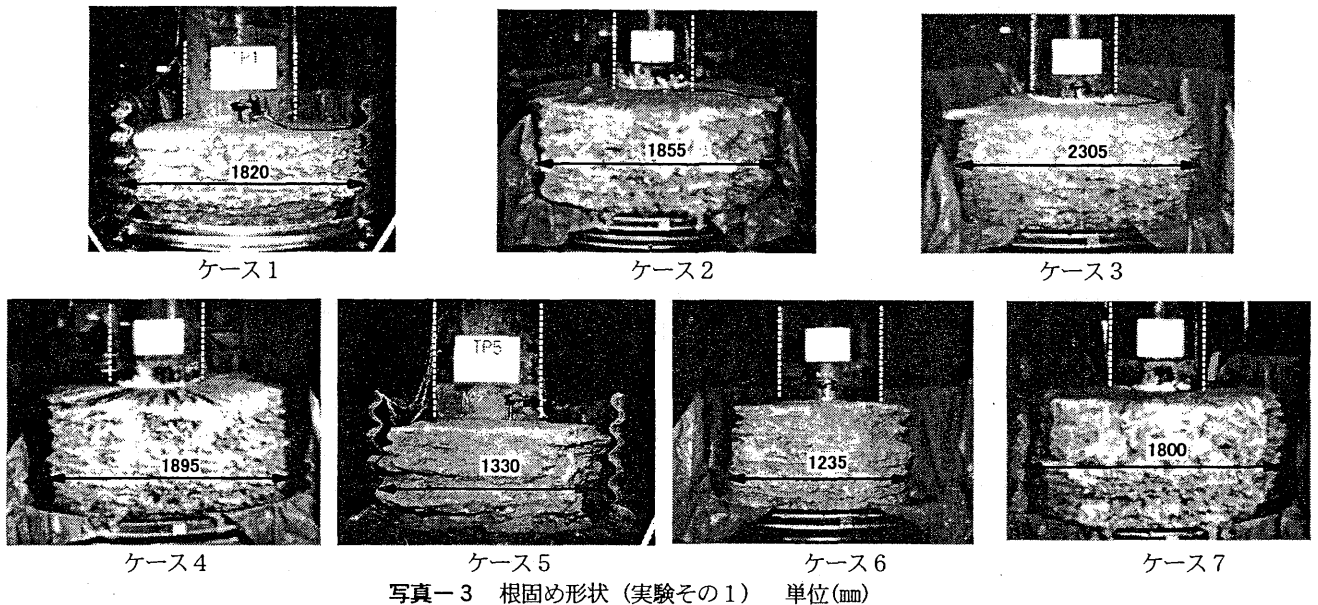


写真-3 根固め形状 (実験その1) 単位(mm)

(ケース6)では噴射流の到達距離が短くなり、安定した根固め形状が得られなかったものと考えられる。したがって、安定した形状を確保するためには標準仕様を用いることが妥当であると考えられた。また、ケース5およびケース6を除く標準仕様の根固め外径の平均値は1.70倍であるのに対して堅固な部分だけで根固め径を評価すると想定値の1.26倍となった。

(4) 根固め部の室内載荷試験

半割調査を行ったケース8、ケース9以外の7体の試験体については室内において載荷試験を行い、破壊メカニズムおよび耐荷力について検討を行った。試験は図-7に示す10MN載荷試験装置を用い、杭頭部には座屈防止用のリブと載荷盤を取り付けた。

また、圧縮強度40MPa程度に調整した石膏を反力台の上に流し、根固め部底面が均一に反力を受けるようにした。

各試験における破壊状況の観察結果から代表的な根固め部の破壊メカニズムを考察する。図-8に破壊状態の模式図を示し、根固め部の破壊の進展状況を以下に示す。まず、鋼管下端から斜め外周へ向ってクラック①が進展し、外周まで到達した段階で水平クラックとして根固め部の周表面に亀裂が現れる。その時点で根固め部の一部が亀裂に沿って滑落した。その後、杭先端から伝達された圧縮力により根固め部にフープテンションが発生し、鋼管外径に沿って円筒状の亀裂②と拡底部分の放射状の亀裂③が同時に発生し、根固め底面まで亀裂が貫通していることが確認されている。その後、根固め中心部に残った

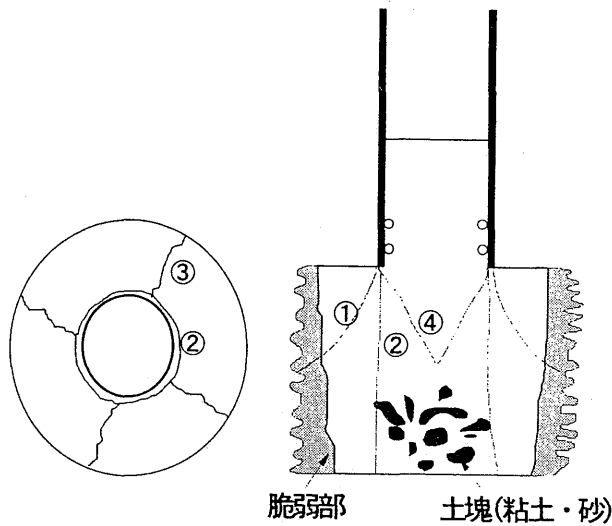


図-8 根固め部の破壊状態

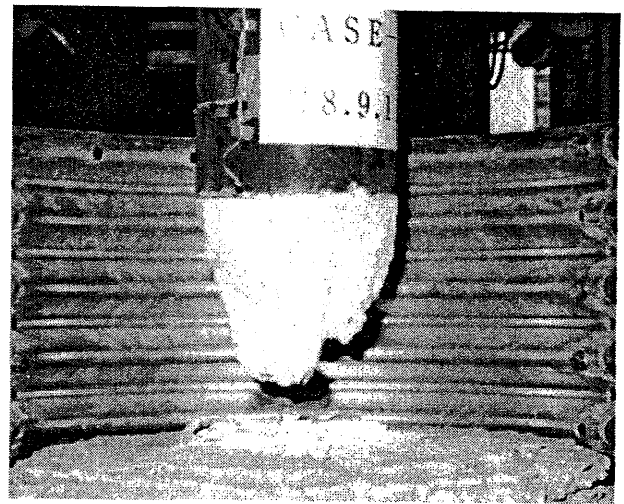


写真-4 杭先端部の破壊状況(ケース4)

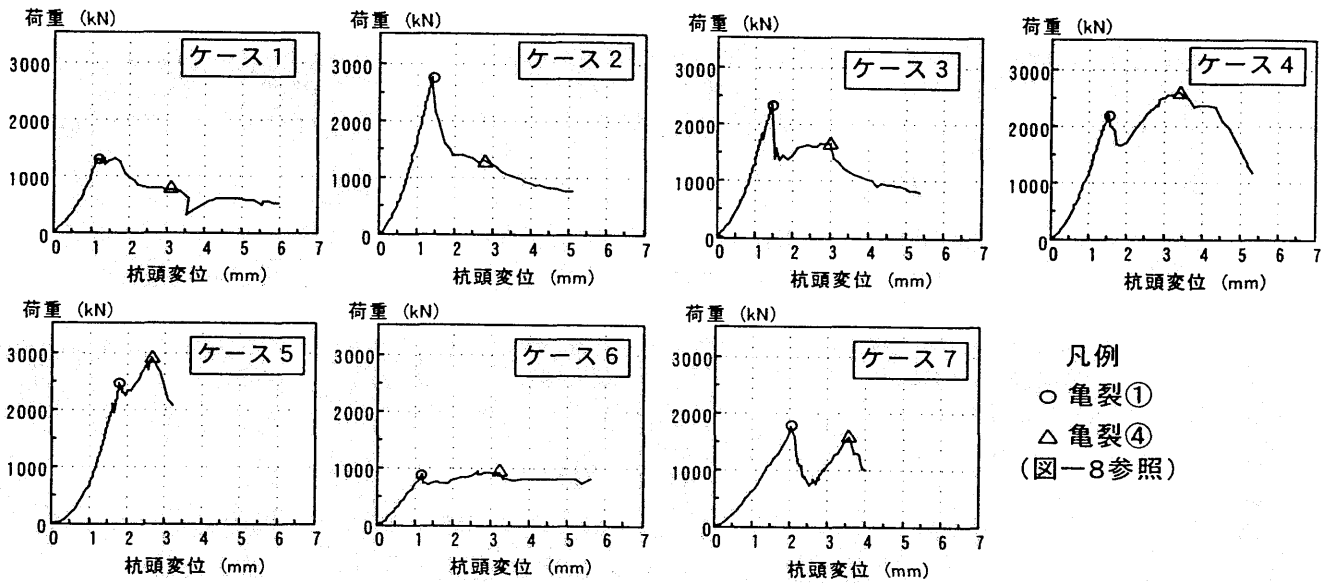


図-9 杭頭荷重～変位関係

円柱状の固化体が一軸圧縮状態となり、杭先端部にくさび状のクラック④が発生して破壊した。破壊後の杭先端部には円錐形のコアが付着した状態となっていた(写真-4)。

杭頭部での荷重～変位関係を図-9に示す。図中には亀裂①が発生した時点をおで、亀裂④が発生した時点をお示している。亀裂①は鋼管の先端板厚部に集中した荷重により発生したものと考えられ、板厚部で支持されていた荷重が開放されるため、亀裂発生後に荷重が低下する。その後、変位の増加とともに亀裂②および③が発生するが、中心部に残された部分が荷重を保持するため明確なピークは現れず、中心部分が一軸圧縮状態で破壊する際に亀裂④が発生し、いくつかのケースで2つめのピークが現れている。ケース1, 4, 7は全て標準仕様で施工

を行なったものであるが、亀裂①および亀裂④の発生時の荷重は各ケースでばらつく結果となった。標準仕様によれば根固め形状はほぼ等しいものが得られているものの、根固め部の強度に関しては土塊の点在状況が異なり、均質性が確保されていないため破壊荷重がばらついたものと考えられる。また、ケース2, 3は根固め径を大きくしたものであるが、両ケースとも亀裂①の発生荷重の方が亀裂④のものよりも大きくなった。これは根固め中心部の土塊の点在により中心部の強度が小さかったためであり、結果のばらつき等も含め、根固め径による破壊荷重の差は明確にならなかった。また、ケース5では、根固め径は小さいものの破壊荷重は大きい値が得られた。このケースは深さあたりの回転数は標準仕様と等しいものの、回転速度・ロッドの移動速度を速

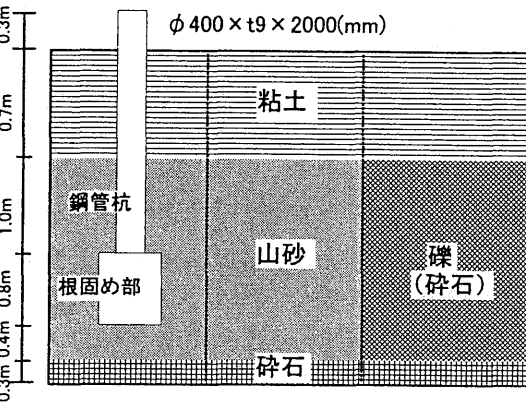
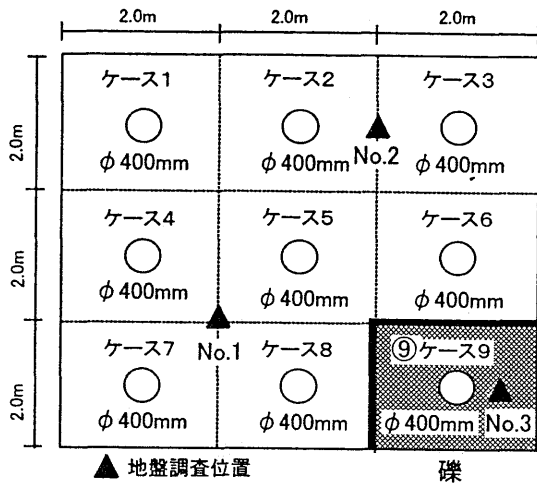


図-10 杭配置および地盤調査地点

くしており、表-3に示すように根固め径は標準仕様で築造された場合に比べ小さくなっている。一方、セメントミルクの注入量は想定根固め径を用いて設定されており、標準仕様と等しいため、セメントミルクの注入量の割合（実根固め体積比）が標準仕様に比べて大きくなった。そのため、セメントミルクによる根固め内部の置換率が向上し、内部の土塊が他のケースに比べて少なくなり、亀裂④の破壊荷重が大きくなったと思われる。一方、ケース6の場合は、ケース5と同様に根固め径が小さくなっており、根固め体積に対するセメントミルクの注入量の割合が標準仕様に比べて大きくなっているが、深さ当たりの回転数が小さく、内部が十分に攪拌されておらず、大きな土塊が混入していたため、亀裂①および亀裂④発生時の荷重は小さくなったと考えられる。

以上より、超高压噴射工法を適用した根固め部の築造実験において以下の点が明らかとなった。

(1) 標準仕様（回転速度5回/分、移動速度50mm/分）による施工を行えば、根固め部は安定した円筒状の形状が得られ、標準仕様よりも施工速度を速くした場合には、形状は不安定なものとなった。

(2) 全てのケースで根固め内部に土塊が分布しており、圧縮強度も目標値 $20\text{N}/\text{mm}^2$ を下回る結果と

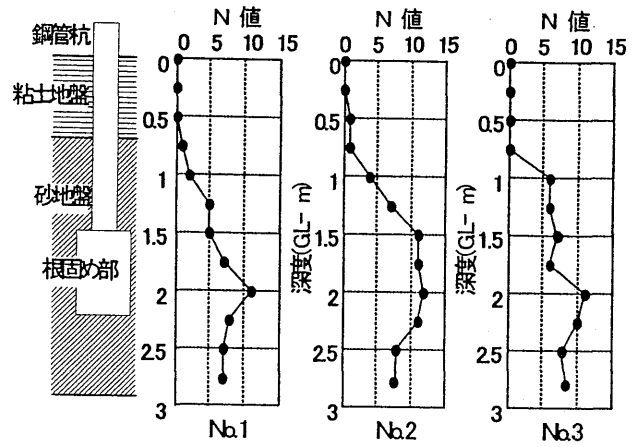


図-11 地盤調査結果

表-4 共通条件

実験パラメータ		設定値
杭径		400mm
想定根固め径		650mm
セメントミルク注入量		根固め部体積の2.0倍
高圧水噴射圧力		40MPa
根固め部	移動速度V	50mm/分
	回転数R	5回/分
	高圧水流量Q	12.1ℓ/分
管内部	移動速度V	110mm/分
	回転数R	11回/分
	高圧水流量Q	12.1ℓ/分

なった。その原因として、噴射ロッドを一度だけ引上げる施工方法としたため、攪拌が十分に行なわず、内部が不均質となったこと、また、実際に築造された根固め径は想定したものよりも大きく、セメントミルクの注入量が根固め体積の1.2倍では不足し、置換が十分に行なわれなかったことが考えられた。

3. 根固め部の築造実験（その2）

(1) 実験概要

超高压噴射工法の標準仕様に基づいて実施した根固め部の築造実験（その1）の結果を踏まえて、施工方法を改善することを目的として再度根固め部の築造実験を実施した。図-10に杭配置および地盤調査地点（▲印）を示す。実験（その1）と同じ山砂を用いて、深さ3.2mの実験用地盤を造成した。

また、杭径400mm、長さ2.0mの試験杭をG.L-1.7mの深さに設置して、下方に長さ800mmの根固め球根を築造した。実験ケース9については礫地盤を想定し、平均粒径20mmの碎石を用いて、砂地盤の場合と

表-5 実験パラメータ (実験その2)

ケースNo	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6	ケース7	ケース8	ケース9
施工方法 ロッドの移動方向	下→上	下→上	上→下	上→下→上	上→下→上	上→下→上	上→下→上	下→上 下→上	上→下→上
圧縮空気	有り	無し	有り	無し					
セメント W/C (%)	60			60	50	70	60		
検討項目	ロッドの移動方向 圧縮空気の有無			繰返し攪拌特性 水セメント比			セメント 高圧噴射	繰返し攪拌 移動方向	礫地盤

同様に200mmごとに振動ローラーで転圧を行ないながら地盤を作製した。図-11に地盤調査結果を示す。N値としてN=5~10程度の値が得られている。

実験(その1)の結果より、根固め部の構造耐力を向上させるためには根固め部の圧縮強度を大きくするとともに、根固め部の内部を均質な状態にすることが必要であると考えられた。そこで、注入したセメントミルクの比重測定や成分分析から根固め内部での混合攪拌状況を確認し、適切なセメントミルクの配合条件や注入量を明らかにした。さらに施工条件として圧縮空気の有無や繰返し施工等の影響についても検討を行った。

(2) 実験パラメータ

根固め施工における共通条件を表-4のように設定した。実験(その1)の結果を踏まえて、根固め形状が安定し、管内の洗浄が十分にできる条件として、噴射ロッドの移動速度および回転数については超高压噴射工法の標準仕様を採用した。また、セメントミルクの流量については、実験(その1)で根固め体積の1.2倍の注入量では根固め内部の土砂の置換が十分に行われていなかったことから、本実験では根固め体積の2倍を注入することとした。

各ケースの施工パラメータの一覧を表-5に示す。ケース1~ケース3は噴射ロッドを1方向に動かし、圧縮空気の影響および噴射ロッドの移動方向の違いによる影響を検討するものである。ケース1は下→上へ噴射ロッドを移動させたものであり、ケース2はケース1から圧縮空気の噴射を省略し、圧縮空気の有無による影響を検討するものである。ケース3は噴射ロッドを上→下に動かして施工したものである。この場合には管内部から高压水の噴射を開始するため、根固め施工前に管内の洗浄を先行して行うこととする。ケース4~9は攪拌特性を向上させるために、噴射ロッドを上下に往復させたものである。いずれのケースともに圧縮空気は用いていない。繰返し施工における手順の詳細を以下に述べる。最初にロッドを下げる際には、高压水のみを噴射し、管

内をクリーニングし、続いて根固め部においても高压水のみを用いて地盤を切削した。ロッドを引き上げるには高压水とセメントミルクを同時にまたはセメントミルクのみを噴射し、現地盤とセメントミルクとの混合攪拌および置換を行う。さらに管内においては高压水の噴射を停止し、セメントミルクのみを吐出し、セメントミルクの濃度が低下することを抑えることとした。ケース4~6はセメントミルクのW/Cを変えたものであり、それぞれ60%、50%、70%とした。ケース7は噴射ロッドの引き上げ時において高压水を停止し、セメントミルクのみを20MPaの高压で噴射する方法を検討している。ケース8は噴射ロッドを下→上、下→上へと同じ方向に2回繰返す施工手順としている。ケース9は礫地盤を想定したものであり、碎石を転圧した地盤において施工を行ったものである。

(3) 根固め部の形状測定結果

実験(その1)と同様に、3週間養生して根固め部を掘り出した。ケース5は掘り出し時に根切りが不十分であったため、引上げ時に根固め部が折損してしまった。そのためケース5以外の試験体8体分について検討を行った。掘り出した根固め部の形状を写真-5に示す。

a) 圧縮空気の有無による影響

圧縮空気を用いたケース1およびケース3と用いなかったケース2を比較すると圧縮空気の有無によって根固め径が大きく変わることが明らかとなった。圧縮空気を用いた場合には、外周部には鬚状の脆弱な部分が存在し、外径は想定した根固め径D=650mmの約2倍の大きさとなった。しかし、強度の高い部分は約850mmであり、想定値の約1.3倍で実験(その1)と同様の結果となった。したがって、圧縮空気を用いる場合には杭径の1.3倍程度までがセメントミルクにより置換される領域となり、その外周部では置換されない領域が残ると考えられる。圧縮空気を用いない場合には、表層部は滑らかであり、脆弱な部分は無かった。根固め径は約530mmで

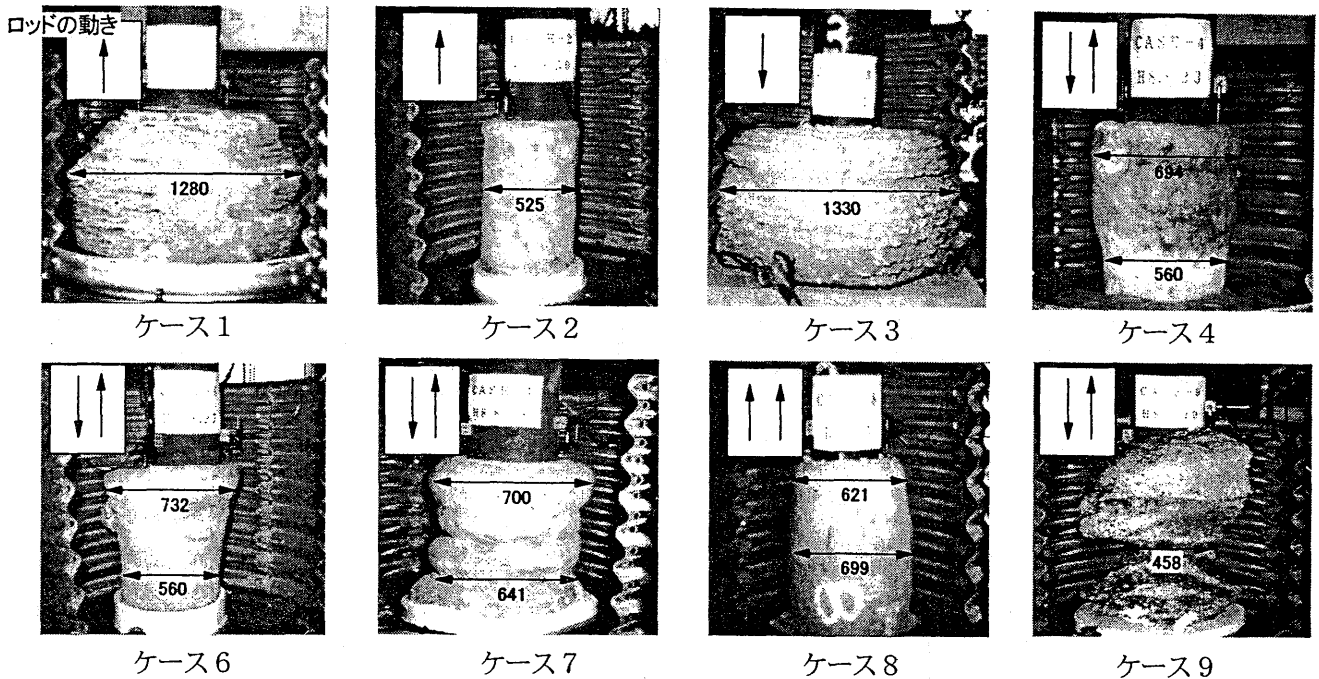


写真-5 根固め部の形状 (単位mm)

あり、想定した根固め径の約80%となった。

b) 繰返し施工による影響

繰返し施工による影響を評価するため、圧縮空気を用いずに繰返し施工を行ったケース4～ケース8と繰返し施工を行わなかったケース2を比較すると、繰返し施工を行った場合には根固め径が深度方向で異なるものの、その大きさは560mm～700mmとなっており、繰返しを行わなかった場合に比べて根固め径は大きくなった。

c) 噴射ロッドの移動方向の違いによる影響

繰返し施工を行ったケースで噴射ロッドを上→下→上と移動させた場合(ケース4, 6)と2回とも下→上, 下→上を繰返した場合(ケース8)との比較を行うと、ケース4, 6は根固め下端部が細く、上方で太くなる形状となっているのに対してケース8の場合には根固め部の下方が膨らむ形状となり、噴射開始位置付近の直径が大きくなっている。この原因として根固め施工の噴射開始時に高圧水の圧力が安定するまで同じ位置で一定時間の噴射を継続しており、その結果、その位置での噴射量が多くなったため、直径が大きくなったものと考えられる。

d) 繰返し施工における高圧水の影響

繰返し施工において最初の上→下へロッドを動かす際には高圧水を噴射し、下→上にロッドを引き上げる際には、低圧のセメントミルクと高圧水によって施工した場合(ケース4, ケース6)とセメントミルクのみを高圧に噴射した場合(ケース7)の比較を行うと、根固め径は同程度の大きさとなった。しかし、ケース7のようにW/C=60%のセメントミル

クを高圧噴射する場合にはポンプやノズルへの負担が大きくなり、噴射が不安定となったため、根固め部の凹凸が大きくなっている。

e) 礫地盤における噴射工法の適用性

ケース9の礫地盤においては他の砂地盤のケースとは異なり、根固め形状がいびつな形となった。噴射工法では砂地盤であれば、高圧水で切り崩し、円柱状に近い根固め部が築造できるのに対して、礫地盤では高圧水で礫石を切り崩すことができず、セメントミルクが礫の空隙に浸透しながら根固め部が形成されたものと推定される。

(4) 根固め部の混合攪拌状況の検討

根固め部内部におけるセメントミルクと高圧水および地盤との混合攪拌状態を検討するため、根固め施工時にオーバーフローしたスライムと養生後の根固め部から試料をサンプリングして成分分析を行った。サンプリングにおいては脱水養生の影響を避けるため、根固め部の中心部から試料を採取した。また、成分分析の方法はセメント協会⁷⁾で提案されている方法であり、セメント分を酸で溶解することで砂分とセメントの混合比率を推定するものである。スライムおよび根固め部の成分分析結果を図-12および図-13に示す。スライムおよび根固め部はセメントと水と砂分より構成され、いずれの結果においても砂分の体積比率は10%以下であり、根固め体積の2倍のセメントミルクを注入した場合には地盤の大部分はセメントミルクに置換される結果となった。次に比重測定および成分分析結果を基に、

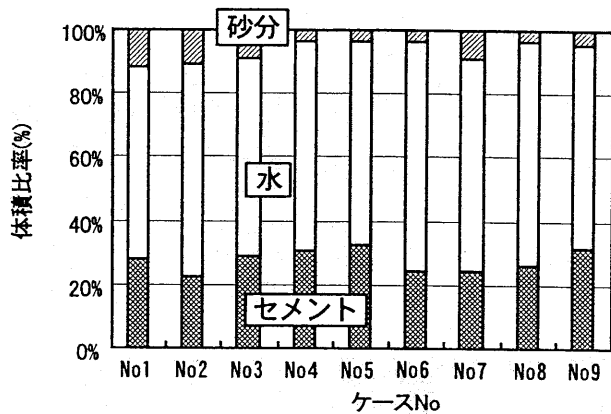


図-1 2 スライムの成分分析結果

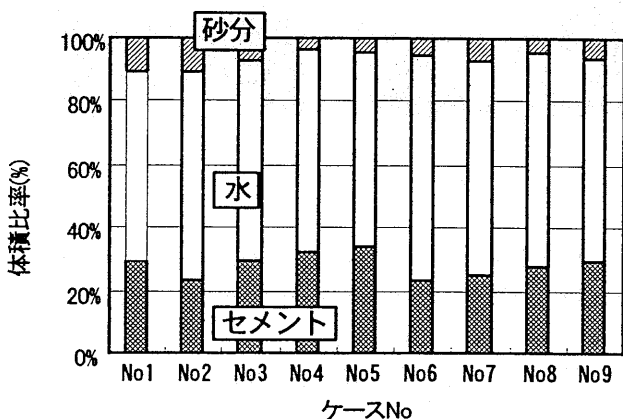


図-1 3 根固め部の成分分析結果

プラントから採取したセメントミルクとスライムおよび根固め部のW/Cを算定した。その結果を表-6に示す。プラントの計量装置の故障により一部のケースで目標値(W/C=60%)よりも大きくなってしまっており、特にケース2, ケース6, ケース7, ケース8のW/Cは80%~90%程度となっていた。図-14に注入前後での水セメント比(W/C)の変化を示す。横軸に注入時のプラントにおけるW/Cを、縦軸に注入後のスライムおよび根固め部の試料から得られたW/Cを示す。図中には高圧水の噴射流量の25%, 50%, 100%がセメントミルクと混合すると仮定した場合のW/Cのラインを示している。注入前後でのW/Cの変化を比較すると、スライムおよび根固め部のW/Cは高圧水の25%が混合すると仮定したラインよりも下側にあり、セメントミルクに大部分が置換され、多くとも25%程度しか高圧水は混合していない結果となった。この場合、注入時のセメントミルクのW/Cは5%程度高くなっている。

(5) 根固め球根部の一軸圧縮強度

注入したセメントミルク、スライムおよび載荷試験後の根固め部から供試体をサンプリングし、一軸

表-6 水セメント比W/Cの算定結果(%)

	プラント	スライム	根固め部
ケース1	65	70	61
ケース2	91	97	93
ケース3	66	69	66
ケース4	64	68	67
ケース5	60	64	58
ケース6	94	94	84
ケース7	81	86	74
ケース8	83	87	75
ケース9	66	67	55

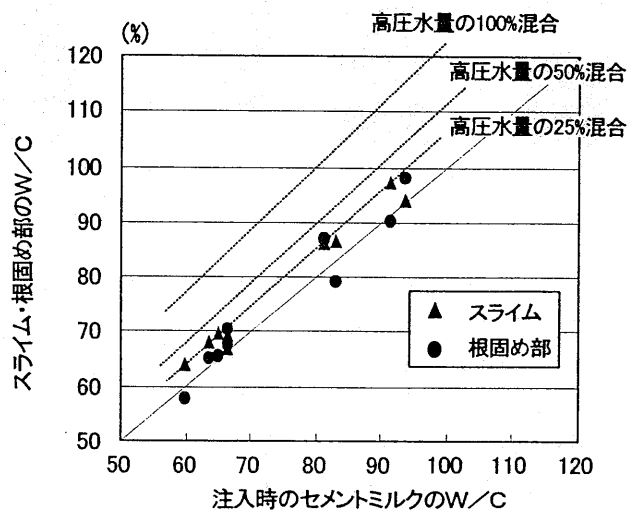


図-1 4 注入前後での水セメント比の変化

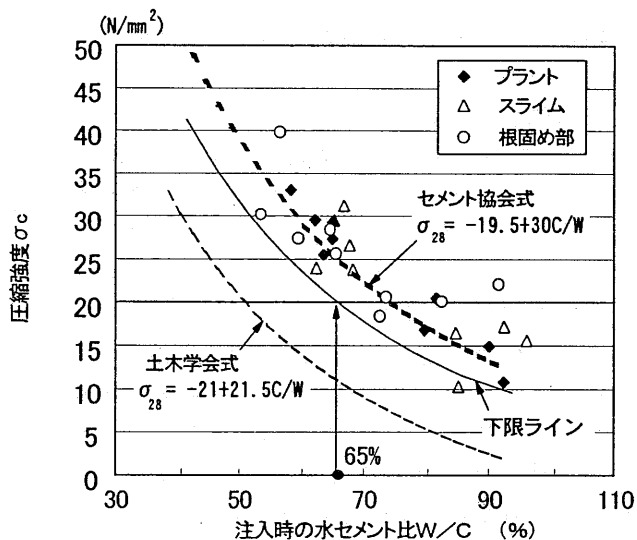


図-1 5 水セメント比と圧縮強度の関係

圧縮強度を測定した。注入時の水セメント比と圧縮強度の関係を図-15に示す。各試験体の圧縮強度はセメント協会式⁸⁾による強度推定値と相関性が高い結果となった。データの下限值を通る曲線を想定

凡例 ○ 亀裂① △ 亀裂② (図-8参照)

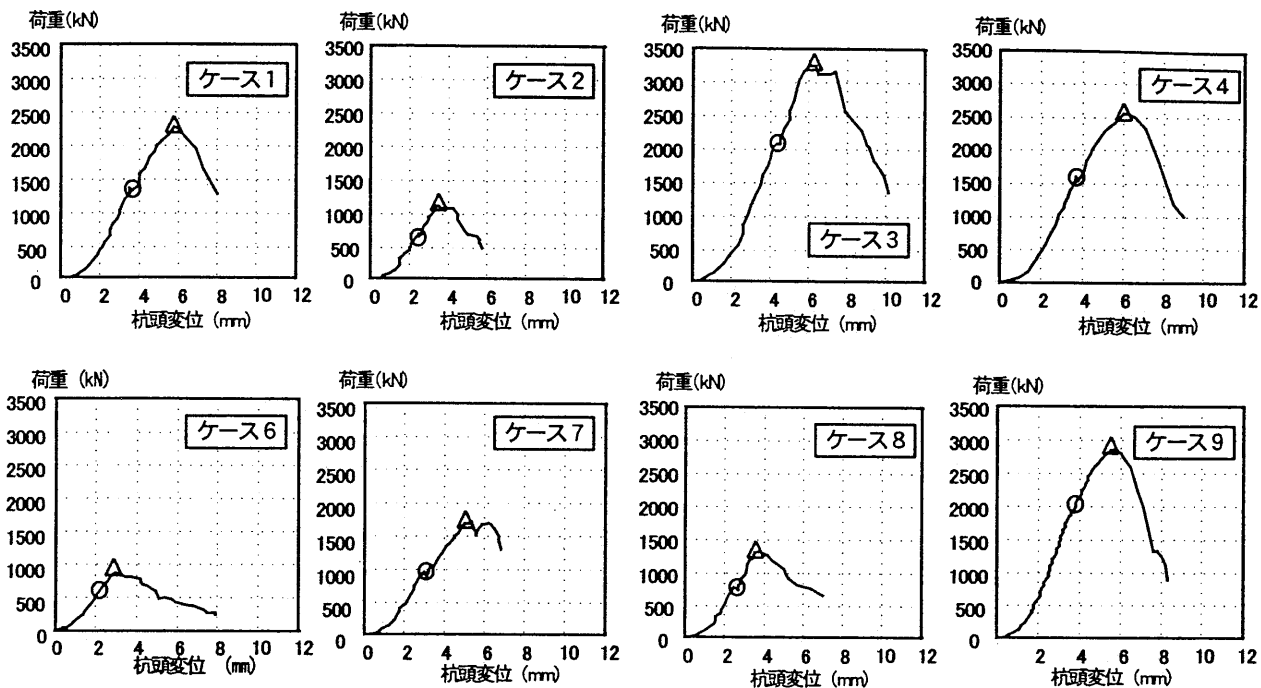


図-16 杭頭荷重～変位関係 (その2)

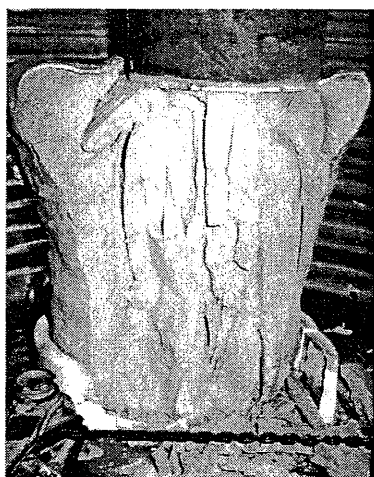


写真-6 根固め部破壊状況 (ケース6)

した場合、目標とする一軸圧縮強度 20N/mm^2 を発現できるW/Cは約65%となっており、注入時のセメントミルクのW/Cが根固め施工時には約5%上昇することを考慮すれば、W/C=60%が必要強度を得るために適切な水セメント比であると考えられる。

(6) 室内載荷試験

掘り出した根固め球根に対して実験(その1)と同様な方法により載荷試験を実施した。ケース5の試験体は掘り出し時に破損したため、載荷試験を行っていない。図-16に各ケースの杭頭部での荷重～変位関係を示す。実験(その1)と同様に図-8における亀裂①と亀裂④が発生した時点をも

れぞれ○と△で示している。本実験においては、全てのケースで亀裂④が発生した荷重の方が大きくなった。破壊後に根固め内部を観察した結果、いずれのケースにおいても土塊はほとんど存在しておらず、そのため根固め中心部の強度が高く、中心部での圧縮破壊で最大耐力が決まったものと考えられる。1例として最も破壊荷重の小さかったケース6の破壊状況を写真-6に示す。この場合にも内部に土塊は無く、中心部での圧縮破壊が生じていることがわかる。また、根固め内部の土塊が少なくなった原因として、繰返し施工により混合・攪拌特性を向上させたことよりも、セメントミルクの注入量を増やして置換率を高めたことの効果の方が大きかったと考えられる。その理由として、ケース1およびケース3は実験(その1)に比べてセメントミルクの注入量のみを想定根固め体積の1.2倍から2.0倍に変えたものであるが、その結果、土塊の量が非常に少なくなったこと、ケース1～3(1度施工)とケース4～8(繰返し施工)を比較した場合、両者の土塊の量及び分布状況に大きな差は無く、繰返し攪拌の影響は明確とはならなかったことがあげられる。

各ケースの最大耐力を図-17に示す。図中にはプラントから採取した注入時のW/Cおよび圧縮強度を示している。ケース2、ケース6、ケース7、ケース8のW/Cは83%～93%となり、圧縮強度は 20.5N/mm^2 以下で、耐荷力も相対的に小さな値となった。一方、セメントミルクのW/Cが60%に近かつ

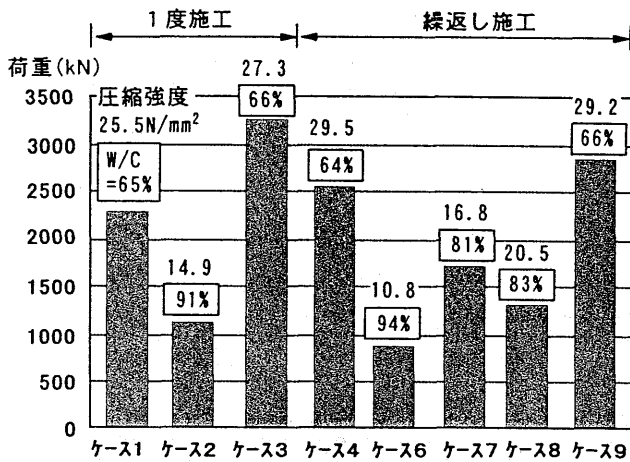


図-17 根固め部の最大耐力

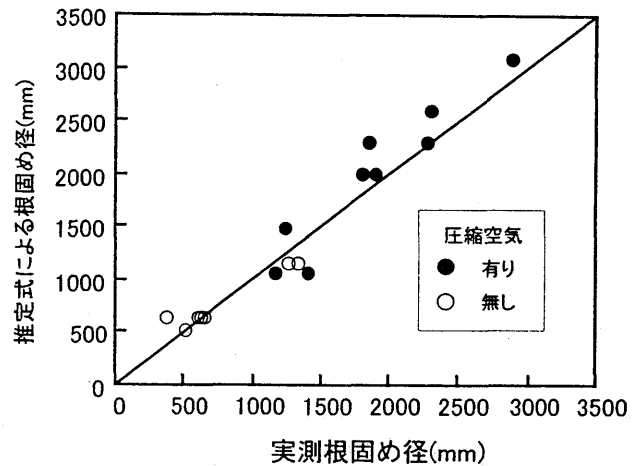


図-18 根固め径の推定精度

たケース1, ケース3, ケース4, ケース9については, 圧縮強度も $25\text{N}/\text{mm}^2$ を超えており, 耐荷力もW/Cが大きかったケースに比べて高い値が得られた。したがって根固め施工においては, W/C=60%として根固め体積の2倍のセメントミルクを注入すれば所定の耐荷力を有する根固め部が築造できると考えられる。

(7) 根固め径の推定式

築造実験(その1)では高圧水の流量 Q , 噴射ロッドの移動速度 V および回転数 R をパラメータにして根固め部の形状や強度に関する検討を行ってきた。また築造実験(その2)においては, エアの有無や繰返し施工による影響を検討した。これらの結果から流量 Q , 移動速度 V , 回転速度 R をパラメータとした根固め径の推定式を算定した。既往の研究⁹⁾において, 高圧噴射流の到達時間 T と切削距離 L , 噴射圧力 P , 流量 Q の相関式が各パラメータの指数関数の積として表現できることが示されており, 本研究においても同様の形式にて根固め径の推定式を求めることとした。実験結果より係数を決定すると式(1), (2)のように根固め径 ϕ_r の推定式が得られた。

エアーを用いる場合

$$\phi_r = 93.9 \times Q^{0.59} \times V^{-0.32} \times R^{-0.47} \quad (1)$$

エアーを用いない場合

$$\phi_r = 41.9 \times Q^{0.59} \times V^{-0.32} \times R^{-0.47} \quad (2)$$

ここで, ϕ_r =根固め径 (cm)
 Q =高圧水の流量 (ℓ/分)
 V =ロッドの移動速度 (cm)
 R =ロッドの回転速度 (回/分)

推定式の妥当性を評価するため, 図-18に実測

した根固め径と推定式によって求めた根固め径の関係を示している。実測した根固め径は根固め高さ3点で計測した値の平均値である。推定式によりほぼ適切に根固め径を算定することができている。

4. 結論

超高压噴射工法を用いた杭先端根固め方法に関して, 実験的な研究を実施した。山砂を転圧して作製した実験地盤において, 根固め部の築造を行ない, 所定の構造耐力を確保するための根固め部の施工条件を明らかにしてきた。その結果を以下にまとめる。

- (1) 根固め部が所定の構造耐力を確保するためには内部を土塊の無い均質な状態とするとともに, 注入するセメントミルクの配合条件を適切に設定することが重要である。
- (2) セメントミルクの注入量を根固め体積の1.2倍とした場合には根固め内部に土塊が点在したのに対して, 根固め体積の2倍のセメントミルクを注入した場合には内部に土塊はほとんど存在せず, セメントミルクで十分に置換され, 均質な状態となっていた。
- (3) 根固め体積の2倍のセメントミルクを注入した場合, 高圧水の約25%がセメントミルクと混合し, 水セメント比が約5%上昇した。また, セメントミルクのW/Cを60%以下として根固め施工を行えば $20\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の圧縮強度を確保することができることが明らかとなった。
- (4) 高圧水の流量, 圧縮空気の有無, 繰返し施工等の施工条件が根固め形状に与える影響について明らかにした。さらに, 高圧水流量 Q や噴射ロッドの移動速度 V , 回転速度 R をパラメータとした根固め径 ϕ_r の推定式を求めた。

(5) 根固め部の載荷試験結果より、根固め中心部の圧縮破壊によりその破壊耐力が決まっており、根固め径の違いによる破壊耐力への影響は小さかった。

今後の課題としては、実大杭に適用した場合の根固め部の品質確認が必要であり、また、杭の性能規定上、沈下特性が重要であることから、根固め部の破壊が沈下特性に及ぼす影響について検討する必要がある。

謝辞：最後に、本研究の実施に際してケミカルグラウト株式会社の吉田宏氏、小滝裕氏には多大の協力を賜りました。ここに深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 青木功：日本建築センター埋め込み杭工法評定における最近の傾向，基礎工，Vol. 23, No. 5, pp. 6～11, 1995.
- 2) 例えば，三浦邦夫，川上圭二，山下久男，吉野学，日比野信一：TN杭（鋼管杭）先端根固め部の荷重伝機構，第20回土質工学研究発表会，pp. 1035～1036, 1985.
- 3) 日本ジェットグラウト協会：ジェットグラウト工法技術資料（第5版），1995.

- 4) 野崎卓次：中掘先端高圧拡大根固め工法による杭の施工法と支持力について，基礎工，Vol. 28, No. 11, pp. 118～123, 1988.
- 5) 山川朝生，吉川吉明，和田祐二，柄川伸一：超高圧噴射置換工法による既設H鋼杭の支持力増強について，土木学会第43回年次学術講演会，Ⅲ-128, pp. 300～301, 1988.
- 6) 脇屋泰士，元木卓也，三村哲弘，福田一夫，森本宣弘：拡大根固め鋼管杭のFEM解析による支持力特性の検討，構造工学論文集，Vol. 47A, pp. 1579～1586, 2001.
- 7) コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，pp. 1421～1422, 1981.
- 8) コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，pp. 343～345, 1981.
- 9) 笹尾光，吉田宏，浅野利三郎：超高圧ジェットを利用した大口径地盤改良（スーパージェット工法）の開発に関する研究，鹿島技術研究所年報，pp. 227～233, 1992.

(2001. 1. 15 受付)

EXPERIMENTAL STUDIES FOR PILE TIP PROTECTIONS BY USE OF JET GROUT METHOD

Yasushi WAKIYA, Takeshi OKI, Koji SUMI, Hiroaki NUMATA
and Nobuhiro MORIMOTO

This paper describes experimental studies for pile tip protections of bored pile by use of Jet Grout Method that was developed for the ground improvement. The pile tip protections were made in the artificial sandy ground and all of them were taken out in order to investigate their strength and failure mechanism through the loading tests. The adequate mixture condition and jetting quantity of the cement slurry to get the required strength were discussed. In addition the differences of the protection shapes due to the quantity of jet water and moving speed of jet rod were examined. The equations for estimating of protection diameter were proposed and its reliability was confirmed.